

М. А. Закиров

КОЭФФИЦИЕНТЫ МАССОПЕРЕДАЧИ В СПЛОШНОЙ ФАЗЕ ПРИ ДВИЖЕНИИ ОДИНОЧНЫХ КАПЕЛЬ В РАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ НЕВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Ключевые слова: Центробежный экстрактор. Массопередача в дисперсных системах в процессе жидкостной экстракции. Коэффициенты массопередачи вокруг капель в поле центробежных сил.

Проведен обзор теоретических и экспериментальных данных о коэффициентах массопередачи в сплошной фазе при движении одиночных капель в процессе жидкостной экстракции. Показана некорректность использования полученных для поля тяжести теоретических моделей и эмпирических уравнений массопередачи для расчета коэффициентов массопередачи в сплошной фазе при движении капель в поле действия центробежных сил. Получено новое критериальное уравнение для коэффициентов массопередачи в сплошной фазе при движении одиночных капель во вращающейся невязкой жидкости.

Keywords: Centrifugal extractor. Mass transfer in dispersed systems in liquid - liquid extraction process. Mass transfer coefficients around drops, moving in centrifugal field.

Theoretical and experimental data of mass transfer coefficients in continuous phase for drops in liquid – liquid extraction process have been discovered in this article. Here is shown that the use of theoretical mass transfer models and empirical equations for gravity field are uncorrected for calculation of continuous phase mass transfer coefficients around drops, moving in centrifugal field. A new criterial equation for mass transfer coefficients in continuous phase around drops, moving in rotating inviscid liquid has been suggested.

При расчете и проектировании центробежных экстракторов, обладающих высокими технико-экономическими показателями по сравнению с гравитационными экстракторами [1, 2], необходимо иметь надежные методы расчета коэффициентов массопередачи в дисперсной и сплошной фазах, полученных при движении одиночных капель во вращающейся жидкости. В связи со сложностью аналитического решения уравнений движения и массопередачи внутри и вокруг движущейся капли, расчетные уравнения для коэффициентов массопередачи получены на основе экспериментальных исследований процесса массопередачи при движении одиночных капель в равномерно вращающейся жидкой среде. Теоретические решения внутренней и внешней задачи массообмена в дисперсных системах в настоящее время получены для твердых частиц, капель и пузырей, только для частных случаев их движения в поле тяжести, в модельных приближениях.

Экспериментальные исследования процесса массопередачи внутри и вокруг одиночных капель, движущихся во вращающейся невязкой жидкой среде, были проведены ранее в работе [3], для различных жидких систем с лимитирующим сопротивлением массопередаче в дисперсной и сплошной фазах.

На основе теоретического анализа дифференциального уравнения движения жидкости в поле действия центробежных сил, уравнений конвективной диффузии и массопередачи при движении одиночных капель в сплошной невязкой жидкой среде авторами [3] впервые получена обобщенная критериальная зависимость для коэффициентов массопередачи в одиночные капли (из капель) в виде:

$$Sh = A_1 \cdot Re^a Fr_c^b Sc^c \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^d \left(\frac{\sigma_{мф}}{\sigma_{пс} + \sigma_{пд}} \right)^e. \quad (1)$$

Здесь $Sh = \frac{kd}{D}$ – критерий Шервуда (Нуссельта –

Nu); $Re = \frac{\omega d \rho}{\mu}$ – критерий Рейнольдса; $Fr_c = \frac{\omega^2 R d}{w^2}$

– центробежный критерий Фруда;

$Sc = \frac{\mu}{\rho D}$ – критерий Шмидта (Прандтля – Pr).

Математической обработкой экспериментальных данных в жидких системах в работе [3] получены два критериальных уравнения для частных случаев лимитирующего сопротивления в дисперсной и сплошной фазах в условиях невязкого обтекания капель:

– для коэффициентов массопередачи внутри капель на шести невязких системах с лимитирующим сопротивлением в дисперсной фазе:

$$Sh_d = 2,60 \times 10^{-3} Re_d^{1,35} Fr_c^{0,21} Sc_d^{0,70} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{0,34} \left(\frac{\sigma_{мф}}{\sigma_{пс} + \sigma_{пд}} \right)^{0,47}, \quad (2)$$

– для коэффициентов массопередачи в сплошной фазе на четырех невязких системах с лимитирующим сопротивлением в сплошной фазе:

$$Sh_c = 1,48 \times 10^{-3} Re_c^{1,35} Fr_c^{0,21} Sc_c^{0,70} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{0,34} \left(\frac{\sigma_{мф}}{\sigma_{пс} + \sigma_{пд}} \right)^{0,47}. \quad (3)$$

Как видно, полученные формулы для дисперсной (2) и сплошной фаз (3) имеют одинаковые показатели степеней при всех критериях подобия, отличие только в свободных коэффициентах A_1 , что свидетельствует об аналогичном характере влияния гидродинамических и массообменных критериев подобия на процесс массопередачи внутри и вокруг капли в исследованных системах.

Для практического использования формулы (2) в инженерных расчетах, в частности, при определении радиальных геометрических размеров зон контакта и сепарации фаз центробежных экстракторов, в работе [4] была предпринята попытка обобщения экспериментальных данных [3] для коэффициентов массопередачи в каплях в критериальной форме, полученной ранее [5] на основе подобных преобразований уравнений движения Навье-Стокса, уравнений неразрывности и уравнения массопередачи через подвижную поверхность раздела капли – жидкая среда:

$$Sh_d = f(Re_d, Ek, Sc_d, \frac{\mu_d}{\mu_c}). \quad (4)$$

Кроме традиционных определяющих критериев Re_d , Sc_d и симплекса вязкостей μ_d/μ_c , содержащихся в известных теоретических решениях и моделях массопередачи внутри и вокруг капель для поля тяжести, предложенное в [5] критериальное уравнение (4) содержит дополнительный критерий Экмана $Ek = \frac{\mu_c}{\rho_c \omega d^2}$, учитывающий специфические

особенности вращающейся жидкости, в частности, возможность двумерного (столбчатого) обтекания капель или твердых частиц под действием центробежных сил в невязких жидких средах [6, 7].

Обработкой экспериментальных данных [3] в системах с лимитирующим сопротивлением в дисперсной фазе, в работе [4] получено обобщенное критериальное уравнение для коэффициентов массопередачи внутри капель, движущихся в равномерной вращающейся жидкости:

$$Sh_d = 2,67 \times 10^{-4} Re_d^{1,72} Sc_d^{0,5} \left(\frac{\mu_d}{\mu_c} \right)^{1,57}. \quad (5)$$

Уравнение (5) удовлетворительно описывает опытные данные [3] для шести невязких систем с лимитирующим сопротивлением в дисперсной фазе, в диапазоне критериев Re_c от 200 до 1000 и Sc_d от 308 до 1042, соответствующих области движения и массопередачи крупных сплюснутых капель.

Из анализа структуры уравнений (4) и (5) видно, что критерий Ek не входит в число значимых определяющих критериев полученного критериального уравнения (5), что свидетельствует об отсутствии заметного влияния эффектов двумерности на процесс массопередачи внутри крупных сплюснутых капель в исследованных системах. Этот вывод согласуется также с данными [8], в которой, на основе экспериментального исследования скорости движения крупных сплюснутых капель во вращающихся невязких жидкостях, не было обнаружено влияния специфического критерия Ek на коэффициенты лобового сопротивления капель, что подтверждает вывод о возможности пренебрежения влиянием двумерных эффектов обтекания капель на скорость движения и, соответственно, на коэффициенты массопередачи в каплях в исследованной области критериев Re_c и Ek .

Как видно, предложенное в работе [4] критериальное уравнение (5), в отличие от уравнения (2), включает классические гидродинамические и массообменные критерии подобия Re_d , Sc_d и симплекс вязкостей μ_d/μ_c , содержащиеся также в известных модельных решениях внутренней задачи массообмена внутри капель и пузырей, а также в эмпирических уравнениях, рекомендованных большинством авторов для обобщения экспериментальных данных по массопередаче в каплях, движущихся в условиях поля тяжести. В частности, структура уравнения (5) и входящие в него критерии подобия идентичны со структурой и определяющими критериями, входящими в циркуляционную модель Левица [9, 10], полученную теоретическим путем для описания коэффициентов массопередачи внутри сферических капель, обтекаемых ламинарными безотрывными (Стоксовыми) линиями тока при $Re_c \ll 1$, а также с турбулентной моделью Хандлоса и Ба-

рона [11], полученной в предположении о полной циркуляции жидкости внутри крупных сплюснутых капель при $Re_c > 100$.

В связи с вышеизложенным и с целью получения критериального уравнения массопередачи, удобного в практических расчетах для определения геометрических размеров центробежных экстракторов, в данной работе предпринята попытка обобщения имеющихся экспериментальных данных о коэффициентах массопередачи в сплошной фазе [3], полученных при движении одиночных капель во вращающейся жидкости на 4 невязких системах с лимитирующим сопротивлением в сплошной фазе, с использованием предложенного ранее [4] обобщенного критериального уравнения (4).

Физико-механические свойства жидких систем, исследованных в [3], представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства исследованных систем [3] с лимитирующим сопротивлением в сплошной фазе

№№ систем	Система: (дисперсная фаза – распределяемый компонент – сплошная фаза)	Плотность фаз, кг/м ³	
		ρ_c	ρ_d
1	Вода – уксусная кислота – бензол	882	997
2	Вода – уксусная кислота – толуол	870	997
3	Вода – уксусная кислота – диизопропиловый эфир	730	997
4	Четыреххлористый углерод – пропионовая кислота – вода	1000	1594

Окончание таблицы 1

№№ систем	Вязкость фаз, Па·с		Коеф-т диффузии, м ² /с $D_c \cdot 10^9$	Критерий Sc_c	Пов. натяжения, Дж/м ² $\sigma \cdot 10^3$
	$\mu_c \cdot 10^3$	$\mu_d \cdot 10^3$			
1	0,634	1,00	1,92	374	30,0
2	0,578	1,00	2,44	272	31,43
3	0,348	1,00	2,45	195	16,99
4	1,148	0,962	0,944	1216	20,24

С целью оценки возможности использования критериального уравнения (4) для обобщения экспериментальных данных [3], а также для сравнения их с известными модельными решениями для поля тяжести [12, 13], на рис. 1 и 2 представлены опытные данные для коэффициентов массопередачи в сплошной фазе k_c в исследованных системах в безразмерных координатах $Sh_c - Re_c$.

Штриховыми линиями (X_1 , X_2 , X_3 , X_4) на рис. 1, 2 приведены также значения критерия Sh_c , рассчитанные по уравнению Хигби [12] для исследованных систем:

$$Sh_c = 1,13 Re_c^{0,5} Sc_c^{0,5}. \quad (6)$$

Данное уравнение, основанное на пенетрационной модели массопередачи (проницания), получено в предположении наличия полной циркуляции частиц жидкости или газа внутри и вокруг

движущихся в поле тяжести каплей и пузырей. Модель Хигби ограничивает скорость массопередачи в сплошной фазе сверху.

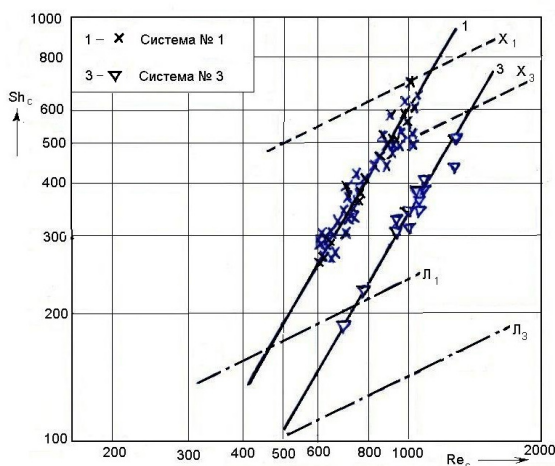


Рис. 1 – Зависимость Sh_c от Re_c для систем № 1 и 3 [3]; L_1 и L_3 – расчет по уравнению Левича (7); X_1 , X_3 – расчет по уравнению Хигби (6) для соответствующих систем

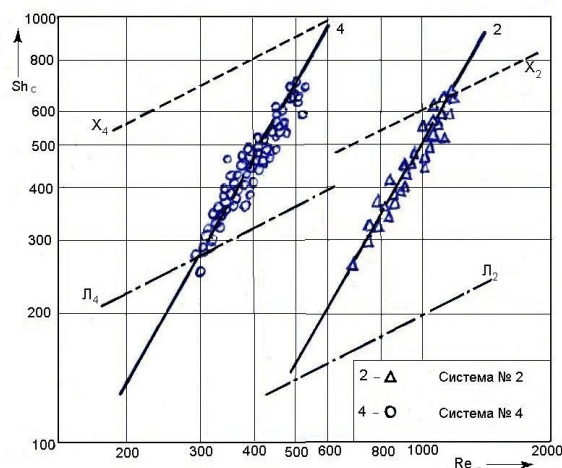


Рис. 2 – Зависимость Sh_c от Re_c для систем № 2 и 4 [3]; L_2 и L_4 – расчет по уравнению Левича (7); X_2 , X_4 – расчет по уравнению Хигби (6) для соответствующих систем

Штрихпунктирными линиями (L_1 , L_2 , L_3 , L_4) на рис. 1 и 2 изображены результаты расчета критерия Sh_c по теоретическому решению Левича [13] для указанных систем:

$$Sh_c = 0,62 Re_c^{0,5} Sc_c^{0,5} \left(1 + \frac{\mu_d}{\mu_c} \right)^{0,5}. \quad (7)$$

Уравнение (7), известное как диффузионная модель Левича [8], получено на основе теоретического решения уравнения массопередачи в сплошной фазе за счет молекулярной диффузии между ламинарными замкнутыми линиями тока в пределах диффузионных пограничных слоев, образующихся внутри и вокруг сферических капель и пузырей при $Re_c \ll 1$. Модель Левича (7) ограничивает скорость массопередачи в сплошной фазе снизу.

Как видно из рис. 1 и 2, во всех исследованных системах коэффициенты массопередачи при движении капель во вращающейся жидкой среде

имеют качественное и количественное отличие от известных для поля тяжести моделей Хигби и Левича. Как и следовало ожидать, диффузионная модель Левича (7) дает заниженные значения коэффициентов массопередачи, а пенетрационная модель Хигби (6) – завышенные. Подобные результаты о качественном и количественном расхождении экспериментальных значений коэффициентов массопередачи в каплях, движущихся во вращающейся жидкости в системах с лимитирующим сопротивлением в дисперсной фазе, от соответствующих коэффициентов массопередачи, рассчитанных по известным теоретическим моделям массопередачи внутри капель, полученным в условиях поля тяжести, были отмечены в работе [4].

Эти данные подтверждают сделанные ранее [3, 4] заключения о некорректности использования полученных в условиях поля тяжести моделей и уравнений для коэффициентов массопередачи при движении одиночных капель и пузырей во вращающейся жидкой среде в условиях действия центробежных сил.

Как следует из данных на рис. 1 и 2, в пределах каждой из исследованных систем экспериментальные данные для коэффициентов массопередачи в сплошной фазе можно описать частной критериальной зависимостью вида

$$Sh_c = A_2 \cdot Re_c^{1,72}. \quad (8)$$

Такая же частная степенная зависимость с тем же показателем степени при критерии Рейнольдса (Re_d) была получена в работе [4] в результате обработки опытных данных [3] для коэффициентов массопередачи внутри капель K_d , движущихся во вращающейся невязкой жидкости при лимитирующем сопротивлении в дисперсной фазе. Это свидетельствует об аналогичном превалирующем характере влияния на процесс массопередачи гидродинамической картины движения частиц жидкости вблизи поверхности раздела фаз как внутри, так и вокруг капель, движущихся во вращающейся жидкой среде под действием центробежных сил.

Возможность обобщения экспериментальных данных [3] в пределах каждой из исследованных систем одной частной обобщенной критериальной зависимостью (8), включающей только гидродинамический критерий подобия Re_c означает, что влиянием критерия Ek на коэффициенты массопередачи в сплошной фазе в исследованных системах можно пренебречь. Этот вывод согласуется с данными [4], в которой также не было обнаружено влияния специфического критерия Ek на определяемый критерий Sh_d внутри капель в невязких системах с лимитирующим сопротивлением в дисперсной фазе в области промежуточных и высоких критериев Re_c , что подтверждает о возможности пренебрежения влиянием двумерных эффектов обтекания капель на процесс движения и массопередачи в центробежных аппаратах в исследованных режимах движения капель [3].

Математической обработкой опытных данных для указанных систем получено, что влияние массообменного критерия Sc_c на критерий Sh_c можно выразить частной линейной зависимостью:

$$Sh_c = A_3 \cdot Sc_c^{1,00}, \quad (9)$$

из которого следует, что коэффициент массопередачи в сплошной фазе k_c не зависит от коэффициента молекулярной диффузии D_c , т.е. $k_c \sim D_c^0$.

Эта частная зависимость качественно совпадает с турбулентной моделью массопередачи в каплях Хандлоса и Барона [11], что, на наш взгляд, свидетельствует о преобладающей роли конвективного переноса на процесс массопередачи в сплошной фазе, а не молекулярной диффузии в пределах турбулентного пограничного слоя вокруг крупных сплошных каплей при их движении во вращающейся невязкой жидкости, в исследованной области критериев Re_c и Sc_c .

С учетом полученных частных зависимостей (8) и (9), и с целью оценки точности аппроксимирующего уравнения (4) для описания коэффициентов массопередачи в сплошной фазе, на рис. 3 представлена корреляционная зависимость экспериментальных значений критерия Sh_c от соответствующих значений безразмерного комплекса $Re_c^{1,72} Sc_c^{1,00}$ в исследованных системах [3].

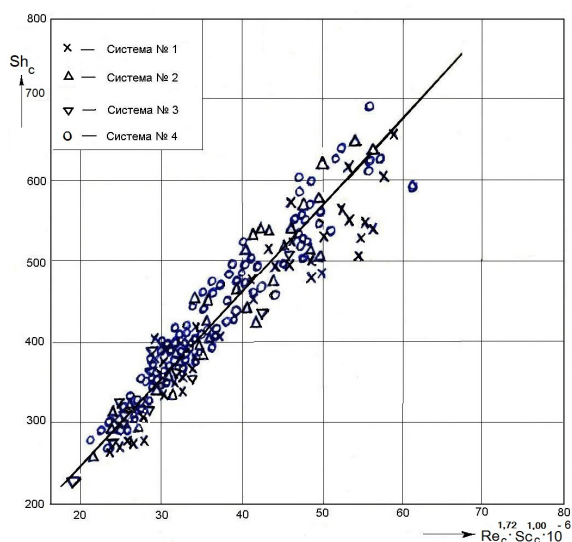


Рис. 3 – Сравнение экспериментальных данных [3] по массопередаче в сплошной фазе в системах № 1, 2, 3, 4 с обобщающим уравнением (10)

Обработкой полученных экспериментальных данных методом наименьших квадратов получено, что опытные данные для коэффициентов массопередачи вокруг каплей, движущихся в равномерно вращающейся невязкой жидкости в четырех системах [3] с лимитирующим сопротивлением в сплошной фазе можно описать обобщенным критериальным уравнением:

$$Sh_c = 1,21 \times 10^{-5} \cdot Re_c^{1,72} Sc_c^{1,00}. \quad (10)$$

В отличие полученного в работе [4] критериального уравнения (5) для коэффициентов массопередачи внутри каплей, уравнение (10) для коэффициентов массопередачи в сплошной фазе не включает в числе определяющих критериев безразмерный симплекс вязкостей μ_d/μ_c , входящий в исходное уравнение (4). На наш взгляд, этот факт обусловлен тем, что влияние гидродинамической картины обтекания на скорость массопередачи в

сплошной фазе в данном случае учитывается входящим в данное уравнение (10) критерием Рейнольдса Re_c . Последний зависит от вязкости жидкости сплошной фазы μ_c и, как определяющий критерий, практически полностью учитывает реальную картину движения частиц жидкости и соответствующее поле распределения концентраций в сплошной жидкости вблизи подвижной границы раздела фаз для процесса движения и массопередачи в центробежном экстракторе.

Полученное критериальное уравнение (10) удовлетворительно описывает опытные данные всех исследованных систем [3] в области изменения определяющих критериев Re_c от 250 до 1400 и Sc_c от 195 до 1216. Как следует из рис. 3, разброс экспериментальных данных от уравнения (10) не превышает $\pm 12,5\%$.

При раскрытии входящих в уравнение (10) критериев подобия можно получить зависимость, позволяющую непосредственно определить значения коэффициентов массопередачи в сплошной фазе через физико-механические и геометрические параметры исследуемых рабочих систем:

$$k_c = 1,21 \cdot 10^{-5} \cdot w^{1,72} d^{0,72} \rho_c^{0,72} \mu_c^{-0,72}. \quad (11)$$

Из последнего уравнения следует, что коэффициенты массопередачи в сплошной фазе при движении одиночных капель в равномерно вращающейся невязкой жидкости в исследованных жидких системах с лимитирующим сопротивлением в сплошной фазе, зависят от диаметра и скорости движения каплей, а также от вязкости и плотности жидкости сплошной фазы.

Литература

1. Последние достижения в области жидкостной экстракции. Под ред. К.Хансона. Пер. с англ. Химия, Москва, 1974. 484 с.
2. С.В. Карпеев, М.И. Фарахов, Д.А., Бурмистров, *Вестник Казан. технол. ун-та*, 11, 532 – 538 (2010).
3. В.В. Кафаров, И.И. Поникаров, В.В. Зайцев, *Журн. прикл. химии*, 2, 5, 1089 – 1095 (1974).
4. М.А. Закиров, *Вестник Казан. технол. ун-та*, 15, 11, 79 – 83 (2012).
5. М.А. Закиров, И.И. Поникаров, Деп. в ОНИИТЭХим г. Черкассы, № 994 хп-Д83, 25 с. (1983).
6. В.И. Соколов. *Центрифугирование*, Химия, Москва, 1976. 408 с.
7. В.Н. Заслоновский, О.А. Цейтлин, И.И. Поникаров, В межвуз. сб.: *Машины и аппараты хим. технологии*, КХТИ им. С.М. Кирова, Казань, 37 – 39 (1975).
8. И.И. Поникаров, В.В. Кафаров, О.А. Цейтлин. *Журн. прикл. химии*, 45, 3, 560 – 564 (1972).
9. В.Г. Левич. *Физико-химическая гидродинамика*, Физматгиз, Москва, Изд. 2-е, 1959. 669 с.
10. В.Г. Левич, В.С. Крылов, В.П. Воротилин, *Доклады АН СССР*, 161, 3, 648 – 651 (1965).
11. А.Е. Handlos, Т. Baron, *A.I.Ch.E. Journal*, 3, 1, 127 – 136 (1957).
12. R. Higbie, *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs*, 31, 2, 365 – 389 (1931).
13. В.Г. Левич. *Журн. физ. химии*, 22, 6, 711 – 729 (1948).

